第42卷 第1期
2025年1月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 42 No. 1
Jan. 2025

中国北方农牧交错带生境质量时空演变与情景模拟

张 莹[1]， 赵媛媛[1]， 刘如龙[1]， 王 岳[2]， 丁国栋[1]

（1. 北京林业大学水土保持学院，水土保持国家林业局重点实验室，北京 100083；
2. 内蒙古财经大学资源与环境经济学院，内蒙古 呼和浩特 010070）

摘 要： 探究脆弱区生境质量变化过程及未来情景格局对于研究区生态环境科学保护具有重要意义。本研究基于土地利用数据、FLUS-InVEST模型及空间自相关方法，分析中国北方农牧交错带2000—2020年生境质量时空格局，并对2040年生境质量进行多情景模拟。结果表明：(1) 草地是研究区的主要土地类型，占比超过41%。2000—2020年研究区耕地变化最为显著，面积减少10157 km^2，林地和建设用地面积有所增加。(2) 研究区东南边界生境质量相对较高；2000—2020年平均生境质量变化不大，但生境质量较低等级和较高等级的面积分别增加2281 km^{2}和1375 km^2，退化度较高的研究区则呈现为点状集中分布在部分建设用地上。(3) 2040年各情景下生境质量呈现出向好趋势，但生态保护情景下生境质量提升最为显著，较高等级面积较2020年增加2514 km^2。建议未来土地利用规划和生态环境保护过程中，需重点关注内蒙古东南部、河北北部等生境质量低的区域。

关键词： 生境质量；北方农牧交错带；土地利用；时空格局

北方农牧交错带是指农业区和牧业区之间的过渡地带，是我国重要的生态屏障[1]。研究区内自然资源的过度利用导致了土壤侵蚀、草原退化、土地荒漠化等一系列生态环境问题，研究区可持续发展面临挑战[2]。"退耕还林还草工程""全国重点区防沙治沙工程"等生态建设的实施，使得研究区生态环境有所改善，但在复杂的自然条件和未来政策影响下，研究区生态可持续性仍具有不确定性[3]。生境是指生物个体、种群或群落生活地域的环境。生境质量是衡量生态系统健康程度、协调研究区发展的重要指标[4]。因此，探究北方农牧交错带生境质量以及未来生境质量情景格局对中国北方脆弱区生态系统可持续管理具有重要意义。目前，生境质量评估方法以实地调查和模型模拟为主[5-6]，实地调查主要涉及对特定研究区生态环境进行详细调查分析获得第一手数据，能准确掌握该地区的真实情况，但不能对研究区生境质量进行长时序的动态监测，且调查范围比较小，耗时耗力。模型法主要包括InVEST模型[7]、IDRISI生物多样性模块[8]、HIS生境适宜性模型[9]和MaxEnt模型[10]等。后三者由于具有大样本、高精度数据、需对复杂生态过程预处理等要求，使得模型应用具有一定的局限性；而以土地利用为主要输入的InVEST模型具有显著的动态化、空间化、多层次和多模块等优势，其生境质量模块可以方便快速地评估不同威胁因子与土地利用/覆盖变化对生态环境质量的影响，是当前应用最为广泛的模型之一[11]。例如，王鹏等[12]采用InVEST模型探讨了近30 a拉萨河流域土地利用变化和生境质量的时空演变特征。生境质量情景模拟以利用土地利用模型和InVEST模型相耦合的思路为主。其中，土地利用常用的模型有CA-Markov、PLUS、CLUE-S、ANN-CA和FLUS等。通过FLUS模型，我们能够识别出影响土地扩张和景观变化的关键因素，并据此预估在不同土地利用类型下的土地斑块的变化趋势，基于多种随机斑块种子对未来土地利用变化模拟模型[13]。例如，荣月静等[14]通过InVEST-CA-Markov模型对南京的土地利用与生境质量进行了模拟。这些研究都为模拟生境质量奠定

收稿日期： 2024-07-14； **修订日期：** 2024-09-18
基金项目： 国家自然科学基金项目(U23A201688)
作者简介： 张莹(1999-)，女，硕士研究生，主要从事荒漠化防治研究. E-mail: 2770981924@qq.com
通讯作者： 赵媛媛. E-mail: yuanyuan0402@bjfu.edu.cn

了扎实的基础。

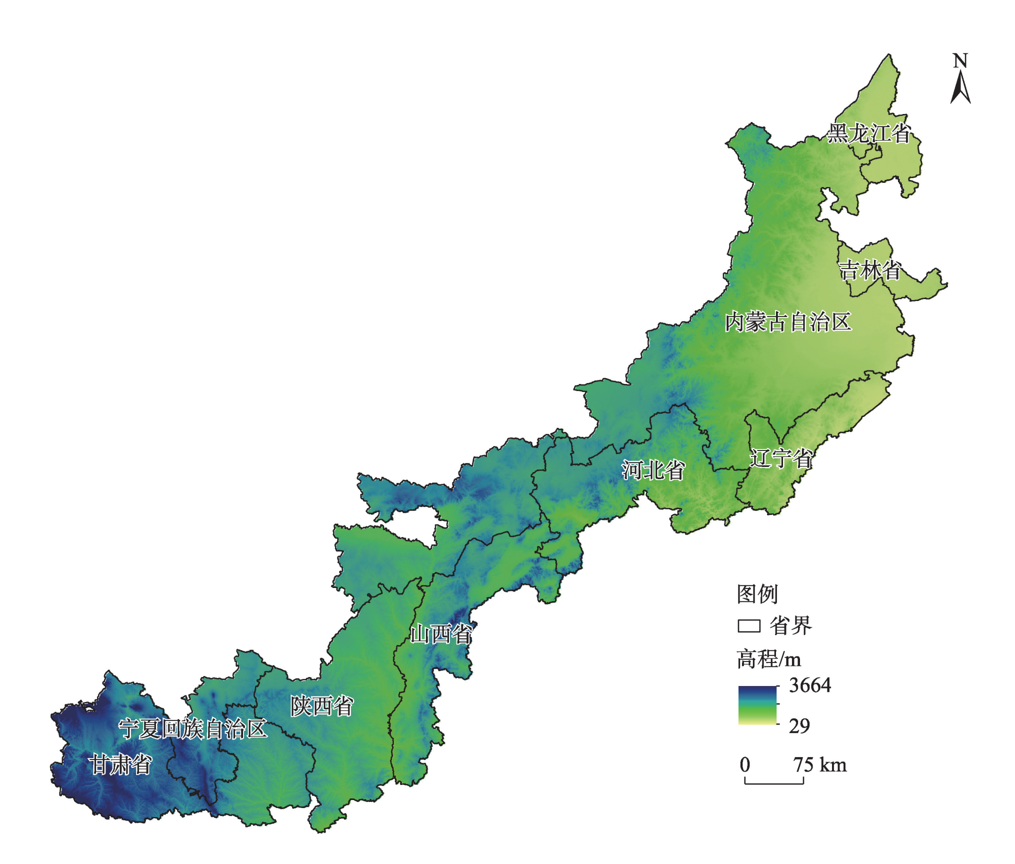
目前北方农牧交错带生境质量相关研究主要集中在土地利用、植被变化和气候等方面。研究发现,研究区2000—2018年变动幅度较大的为耕地,变化最剧烈的为建设用地,整体生境质量偏好,较高及高等级生境质量研究区占据研究区近一半;生境质量数值呈两极化分布,分布格局趋于"南高北低"等结果[15]。北方农牧交错带多年年均植被净初级生产力在东北部呈中间低四周高的分布;而在中南部植被净初级生产力的分布呈现自南、东南向北、西北减少的分布特征[16]。2000—2020年研究区年降水量和平均温度都显示出波动性的上升态势。2000—2010年气候总体呈现出暖干化的趋势,其中降水量表现出波动性的下降模式,这主要在中东部地区有所体现。2010—2020年该地区的降水量呈现出上升的态势,与此同时,年均温度的上升也非常明显。在趋势发展下,中国北方农牧交错带的耕地和林地面积有所增加,而草地的面积则有所减少。在生态保护下,草地和林地的面积有所增加,而用于建设的土地则略有扩大,与此同时,耕地的总面积则明显缩减[17]。但在北方农牧交错带整个研究区未来情景模拟预测下生境质量的研究还鲜见报道。

因此,本研究以中国北方农牧交错带为研究对象,采用InVEST模型模拟2000—2020年生境质量变化过程,并与FLUS模型相耦合,揭示了2040年研究区未来趋势发展、生态保护、经济发展和生态保护等情景下的生境质量变化,该研究旨在为中国北方农牧交错带的生态保护和高质量发展提供科学的理论支持。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

北方农牧交错带的范围划分标准各异。本文参照石晓丽等[18]基于实际土地利用方式界定的研究区边界。重要研究区共涉及山西、陕西、甘肃、宁夏回族自治区、河北、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江9省区的部分研究区(图1)。带状研究区东宽西窄,位于内蒙古自治区的东南部。该区地貌主要以高



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2019)1822号,对底图边界无修改。下同。

图1　研究区地理位置

Fig. 1　Location of the study area

原、丘陵结合为主，部分为平原、山地。北方农牧交错带海拔29~3664 m，海拔从东到西呈上升趋势[18]。降水量由南向北减少，平均降水量300~450 mm；四季温差明显，温度由西南向东北减小，平均温度2~8 ℃；年大风日数约30~100 d。植被覆盖度低，土壤以黄绵土、栗钙土和褐土为主，由于气候、地形和土壤条件的综合影响，该地区的植被主要由栽培作物和草原组成，这两者在地理空间上呈现出交错的分布模式，同时也伴随着灌丛和阔叶林在空间上的零星分布。多年来，研究区一直存在过度开垦、过度放牧、水资源利用不当等现象，导致生态环境退化[17]。

1.2 数据来源

主要包括土地利用/覆盖、植被、地形等数据。中国科学院资源环境科学与数据中心提供土地利用/覆盖数据，其空间分辨率为30 m[19]，重采样到1 km；NDVI数据来源于MOD13A3数据集，空间分辨率为1 km（https://search.earthdata.nasa.gov）；GDP栅格数据和行政区划矢量数据由中国科学院资源环境科学与数据中心提供，分辨率是1 km（https://www.resdc.cn）。WorldPop人口网格数据集（https://www.worldpop.org/）是人口密度数据的主要来源。年降水量、年均气温数据来源于国家地球系统科学数据中心（http://www.geodata.cn/），利用ArcGIS栅格计算器得到年平均气温和降水栅格数据。数字高程模型（DEM）通过地理空间数据云（http://www.gscloud.cn/）获取，计算推导得到海拔、起伏度和坡度。所有栅格数据统一分辨率为1 km。

1.3 研究方法

1.3.1 *土地利用/覆盖变化* 在研究区的某一特定时间段，土地利用类型之间的转换分析通常基于土地利用转移矩阵来进行。这种分析不仅可以揭示研究结束时各种土地利用类型的转换趋势和来源，还可以展示转换的数量特性，进而揭示研究区内土地利用的变化趋势。其表达式为[20]：

$$S_{ij}=\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & S_{n3} & S_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：n代表了土地利用的总类型数量；i和j代表了研究的初始和结束阶段的土地使用模式（$i,j=1,2,\cdots,n$）；S_{ij}代表在研究期间从i地类到j地类的转换面积。

1.3.2 *生境质量评估与演变* 使用InVEST 3.12软件中的Habitat Quality模块来评估生境质量。该方法以土地利用/覆盖数据为基础，根据威胁因子对生境的影响距离和程度，综合考虑各类生境的生境适宜度以及通过评估威胁因子的敏感性，计算生境的质量。本研究中，生境包括林地生态系统、草地生态系统、水域生态系统；潜在威胁源包括受到人类活动影响较大的耕地、城乡居民用地和沙地、盐碱地、裸岩石质地、裸土地和戈壁等未利用地。结合已有研究[21-23]、研究区特征以及专家知识，构建了相关参数（表1和表2），并对北方农牧交错带生境质量进行评价。计算公式如下[24]：

$$Q_{xj}=H_j\left[1-\left(\frac{D_{xj}^Z}{D_{xj}^Z+k^Z}\right)\right] \tag{2}$$

$$D_{xj}=\sum_{r=1}^{R}\sum_{y=1}^{Y_r}\left(\frac{W_r}{\sum_{r=1}^{R}W_r}\right)r_y i_{rxy}\beta_x S_{jr} \tag{3}$$

式中：Q_{xj}为生境质量；D_{xj}为生境退化度；H_j为生境适宜度；Z为模型默认参数，通常取值为2.5；k为半饱和常数；R为威胁因子整体数量；Y_r为威胁因子栅格单元y的总数量；W_r为威胁因子的影响权重值；r_y为栅格单元上的威胁因子值；i_{rxy}为威胁因子的影响研究区范围；β_x为栅格x的可达性水平；S_{jr}为土地利用类型j对威胁因子r的敏感程度。模型运行前需要先对所有的土地利用/覆盖数据以及威胁因子数据进行栅格化处理[25]。

本研究将生境质量按照自然间断点分为低（0~0.46]、较低（0.46~0.61]、中等（0.61~0.80]、较高（0.80~0.90]和高（0.90~1]5个等级，将生境退化度按照自然间断点分为弱（0~0.051]、较弱（0.051~0.143]、中等（0.143~0.262]、较强（0.262~0.817]和强（0.817~1]5个等级。

通过空间自相关方法来分析研究区生境质量

表1 生境威胁因子的影响范围及其权重

Tab. 1 Impact range and weight of habitat constraint factors

威胁源	权重	最大影响距离/km	衰退类型
耕地	0.21	2	线性衰退
城乡居民点	0.32	5	指数衰退
未利用地	0.32	10	线性衰退

表2　不同威胁因子下生境适宜性以及相对敏感度

Tab. 2　Habitat suitability and relative sensitivity under different threat factors

土地利用类型	生境适宜度	敏感度		
		耕地	城乡居民点	未利用地
耕地	0.5	0.3	0.4	0.3
林地	0.9	0.6	0.8	0.8
草地	0.5	0.5	0.55	0.6
水域	0.8	0.7	0.8	0.9
城乡居民点	0	0	0	5
未利用地	0	0	0	0

注:未利用地包括沙地、盐碱地、沼泽地、裸岩石质地、裸土地、戈壁和其他。

的空间集聚程度。空间自相关研究的是地理事物或现象中某一特性在不同的空间位置上的相互关联性,也是对邻近单元位置属性值相似程度的定量描述[26]。采用全局空间自相关分析(Moran'I)中关联性关系指数指标来分析北方农牧交错带生境质量的相关性和聚集程度。

$$\text{Moran'}I=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}} \tag{4}$$

式中:n为研究区的空间网格单元数量;x_i和x_j分别为单元i和单元j的观测值;$\bar{x}$为所有单元观测值的平均值;w_{ij}为空间单元i和j的权重矩阵。Moran'I的值介于-1~1,值等于0,表示结果不相关;值大于0,表示结果呈正相关,具有相似属性的对象聚集在一起,反之亦然。

1.3.3　生境质量情景模拟　采用FLUS-InVEST耦合模型模拟中国北方农牧交错带2040年情景格局。FLUS模型由发生概率计算模块和元胞自动机(CA)模块组成[27]。在仿真过程中,基于人工神经网络(ANN)的概率计算模块生成对应适宜性概率。基于自适应惯性竞争机制的元胞自动机包括邻域影响因素和转化成本,结合各土地利用类型的适宜性概率和未来需求要素总量,计算出元胞转换的整体可能性。最终,采用轮盘选择方法来评估每一个像元是否经历了土地利用类型的转变,从而模拟未来土地利用类型的变化趋势完成预测。不同情景下,各土地利用类型未来需求不一致,FLUS模型的元胞自动机模块需要提前输入每种未来土地利用类型的数量和规模。因此,在应用FLUS模型时,应提前预测每种土地利用类型的未来需求[28]。

采用FLUS模型对不同情景下土地利用类型进行预测。在计算适宜性概率数据时注意要对各驱动因子要统一行列号、分辨率及坐标系等。在Markov Chain预测时,要进行多次调参使得Kappa系数在75%以上,经验证Kappa系数为78.9%,满足研究的需要。根据农牧交错带地区实际情况共设置趋势发展、经济发展、生态保护、耕地保护等4种情景,模拟土地利用类型情景格局。经参考相关文献[13]且向有关专家请教,最终采用经验赋值法得出耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用地设置邻域权重为0.53、0.45、0.43、0.9、0.95和0.63。限制转移矩阵四种情景的具体设置如表3所示。

2　结果与分析

2.1　土地利用/覆盖变化过程

草地是北方农牧交错带的主要地类,其次是耕地,水域面积最小(图2)。2000—2020年林地和建设用地的面积增长,而其他土地面积则有所减少(表4)。在北方农牧交错带,耕地、林地和草地三者之间的转换非常剧烈,耕地和草地间的转化面积最大,林地新增面积的主要来源是耕地。

2.2　生境质量评估与演变

北方农牧交错带生境质量在空间上呈现出明显的差异,主要分为中等生境质量和较低生境质量两大类(图3)。中等生境质量所占面积比例为52%~56%,而相对较低的生境质量所占比例大约是20%。生态环境质量在东南部较高,而东北部相对较低。从时间的角度看,2000年、2020年的生境质量平均值分别是0.498和0.494,较高的生境质量在2000—2020年增多了1375 km^2,而较低的生境质量则在2000—2020年有所上升面积增加2281 km^2,中等及中等以上生境质量面积在2000—2020年减少9615 km^2。

北方农牧交错带主要表现为轻度退化、相对较弱的退化以及中度退化,但也有一些研究区显示出强烈的退化趋势。从空间分布来看,研究区东南部林地和草地的生境退化程度相对较低,而生境退化度较高研究区则呈现为点状分布,其覆盖范围相对较小,并且主要集中在部分建设用地上;从时间角

表3 四种情景下土地利用类型限制转移矩阵设置

Tab. 3 Restricted transfer matrix setting for the various land-use types under the four scenarios

类型	趋势发展						经济发展					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1
林地	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0
草地	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
水域	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1
建设用地	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0
未利用地	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1
类型	耕地保护						生态保护					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
林地	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
草地	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0
水域	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0
建设用地	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
未利用地	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注:转移矩阵中1代表允许转化,0代表不能转化。

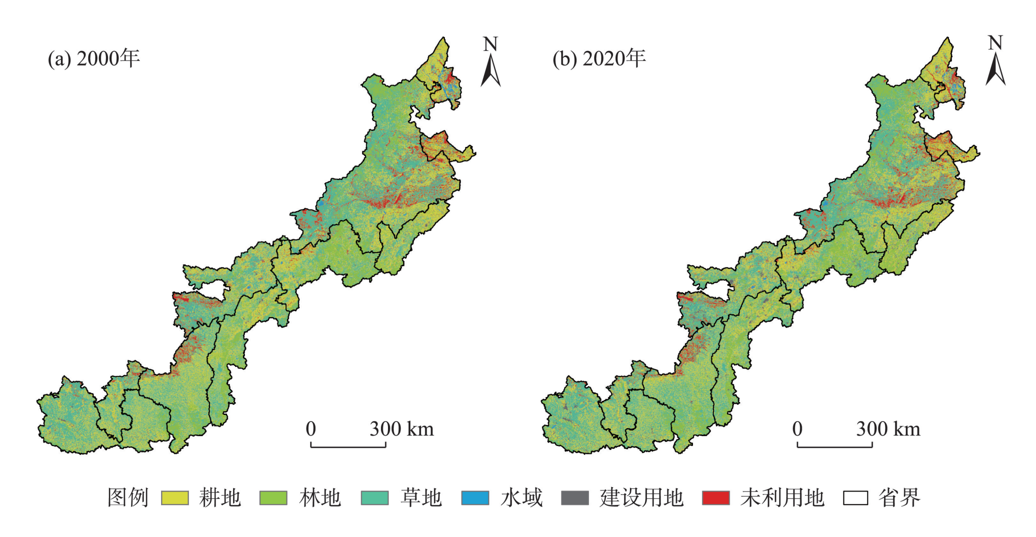


图2 2000年和2020年北方农牧交错带土地利用分布

Fig. 2 Land use distribution of the agro-pastoral ecotone of northern China in 2000 and 2020

表4 2000—2020年北方农牧交错带土地利用类型面积转移矩阵

Tab. 4 Land use change matrix in the agro-pastoral ecotone of northern China from 2000 to 2020 /km^2

2000年	2020年					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	206085	6804	16922	810	5610	871
林地	3359	99784	4880	175	722	186
草地	13991	9789	263569	445	2874	2354
水域	852	178	340	9226	152	1185
建设用地	1226	170	323	37	11859	46
未利用地	1436	273	2873	288	537	35977

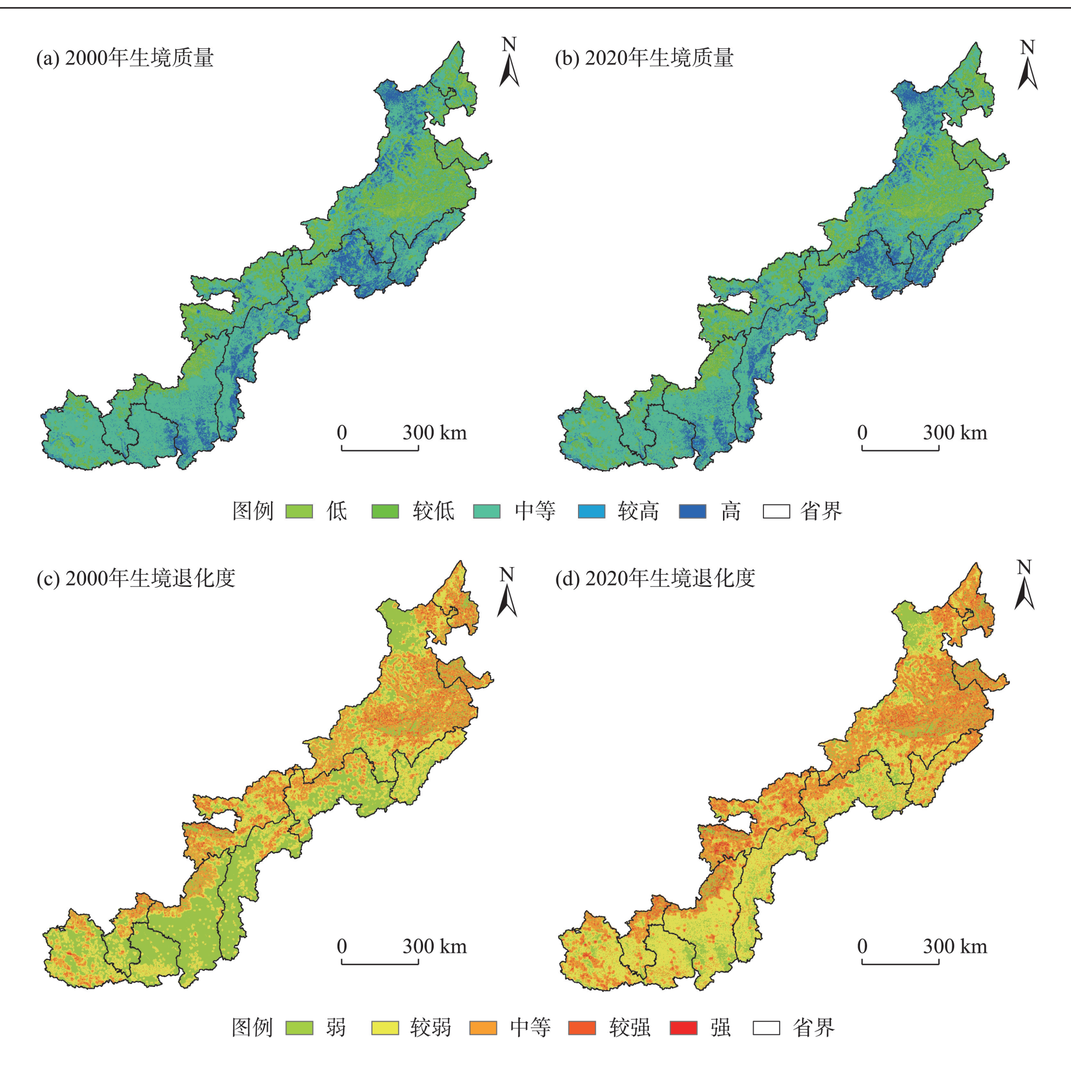


图3　2000—2020年北方农牧交错带的生境质量与生境退化度的时空变化

Fig. 3　The spatial-temporal development of habitat quality and degradation in the agro-pastoral ecotone of northern China from 2000 to 2020

度看,2000年和2020年的退化度平均值分别是0.136和0.493。生境质量的退化度上升,而低生境退化度的面积逐步减少。从宏观角度看,北方农牧交错带的生境质量正在逐渐恶化,并且这种退化趋势略有增强。

北方农牧交错带中等生境质量占比最高达到一半,低生境质量面积和高生境质量面积占研究区生境质量面积的20%。2000年、2020年北方农牧交错带生境质量的全局自相关莫兰指数分别为0.736和0.729,表明北方农牧交错带的生境质量具有一定程度的空间集中特性。空间聚集因子的结果显示(图4),热点区主要集中在北方农牧交错带的东南和西北,这里的植被覆盖率很高,生态环境也相对较好。冷点区主要集中在北方农牧交错带的北部与西南部。研究区以建设用地和耕地为主,生境质量相对较差。

2.3　2040年生境质量情景格局

北方农牧交错带不同情景土地利用类型均以耕地、草地、林地为主,水域面积最小,这与2020年土地利用类型特征基本一样(表5,图5)。趋势发展情景下,北方农牧交错带草地扩张最明显,而林地面积下降较多。林地面积缩小16384 km^2,草地面积增加17749 km^2。生态保护情景下,土地利用类型格局的变化呈现林地面积扩大而未利用地面积呈下降趋势。其中,未利用地面积减少2368 km^2,林地扩大2163 km^2。耕地保护情景下,保护现有耕地,耕地略有扩大,林地面积减少15560 km^2,草地面积增加17747 km^2,其他的种类变动不大。在经济发展的情景下,林地的面积缩减了12026 km^2,草地面积增加量与耕地保护情景相同。

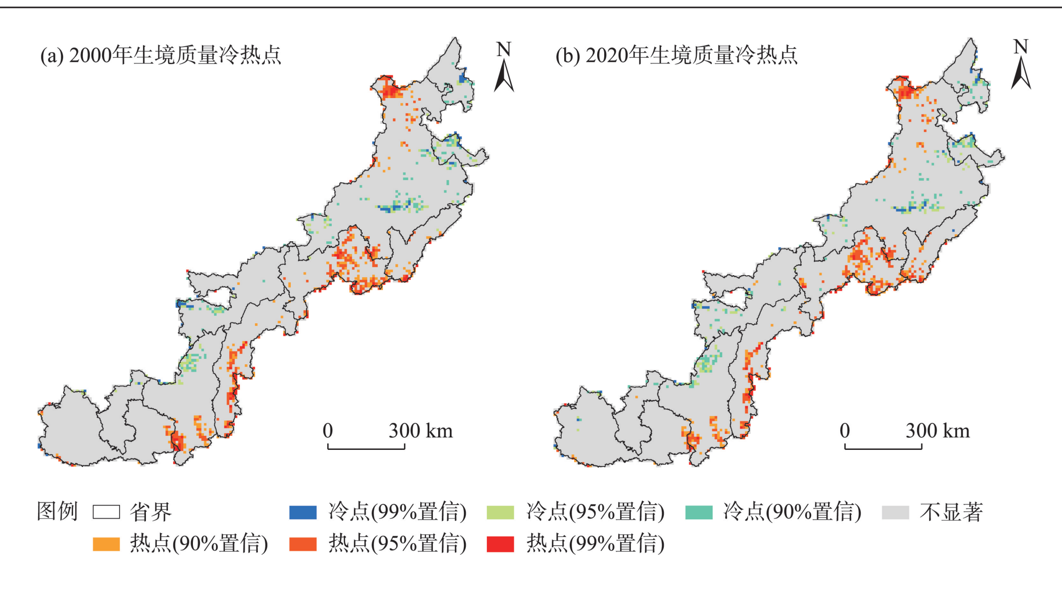


图4 2000—2020年北方农牧交错带生境质量冷热点

Fig. 4 The critical areas of habitat quality in the agro-pastoral ecotone of northern China from 2000 to 2020

表5 2020年和2040年各情景下北方农牧交错带土地利用类型面积

Tab. 5 The land use areas under different scenarios in 2020 and 2040 in the agro-pastoral ecotone of northern China /km²

土地利用类型	2020年	2040年			
		趋势发展	生态保护	经济发展	耕地保护
耕地	226956	223700	227286	223700	227146
林地	117012	100628	119175	104986	101452
草地	288918	306667	288756	306665	306665
水域	10983	10578	10985	10886	10968
建设用地	21756	26424	21791	21756	21761
未利用地	40619	38247	38251	38251	38252

不同情景生境质量均以中等、较低和高为主(表6),高生境质量主要分布在研究区东南部。2040年趋势发展情景下,相对较低的生态质量研究区减少最多,达162625 km²。据此,我国北方农牧交错带生境质量总体上呈恶化态势,生态环境问题比较严重。在生态保护情景中,低生境质量面积下降160347 km²,而中等生境质量面积上升178294 km²,相对于趋势发展情景而言,低生境质量面积收缩而高生境质面积上升。低生境质量面积在经济发展情景中下降了122169 km²,中等生境质量的面积扩大了147722 km²。

3 讨 论

土地利用类型变化最大的是草地,耕地和草地的相互转移最为剧烈,耕地转变为草地的面积为16922 km²,而林地的面积增长了7897 km²,这与我国的退耕还林政策有着紧密的联系[29]。在所有土地类型中,水域和建设用地所占的比例最低。由于城市规划和政府政策的影响[30],建设用地面积增长了8095 km²,可能由于城市化加速使得需求增加。虽已有相关政策,如耕地占补平衡[31],但部分耕地被侵占仍然没有得到有效的控制。生态保护情景下,林地有较大幅度增加,其主要分布在内蒙古和河北地区,可能与这些地方是细叶小檗(*Berberis poiretii Schneid.*)、沙地柏(*Sabina vulgaris.*)、沙柳(*Salix cheilophila*)等灌木林的适宜分布区有关[32]。因此,适当地开展灌木林地的飞播,有利于研究区退化土地的恢复。

生境质量的时空格局主要与气温、降雨、土壤、地形、植被覆盖度等自然因素有关。气温和降雨通过影响生态系统水分供应和生物多样性进而影响生境质量,土壤类型直接影响植物生长发育从而影响生态系统生产力。海拔、地形起伏度等地形因素

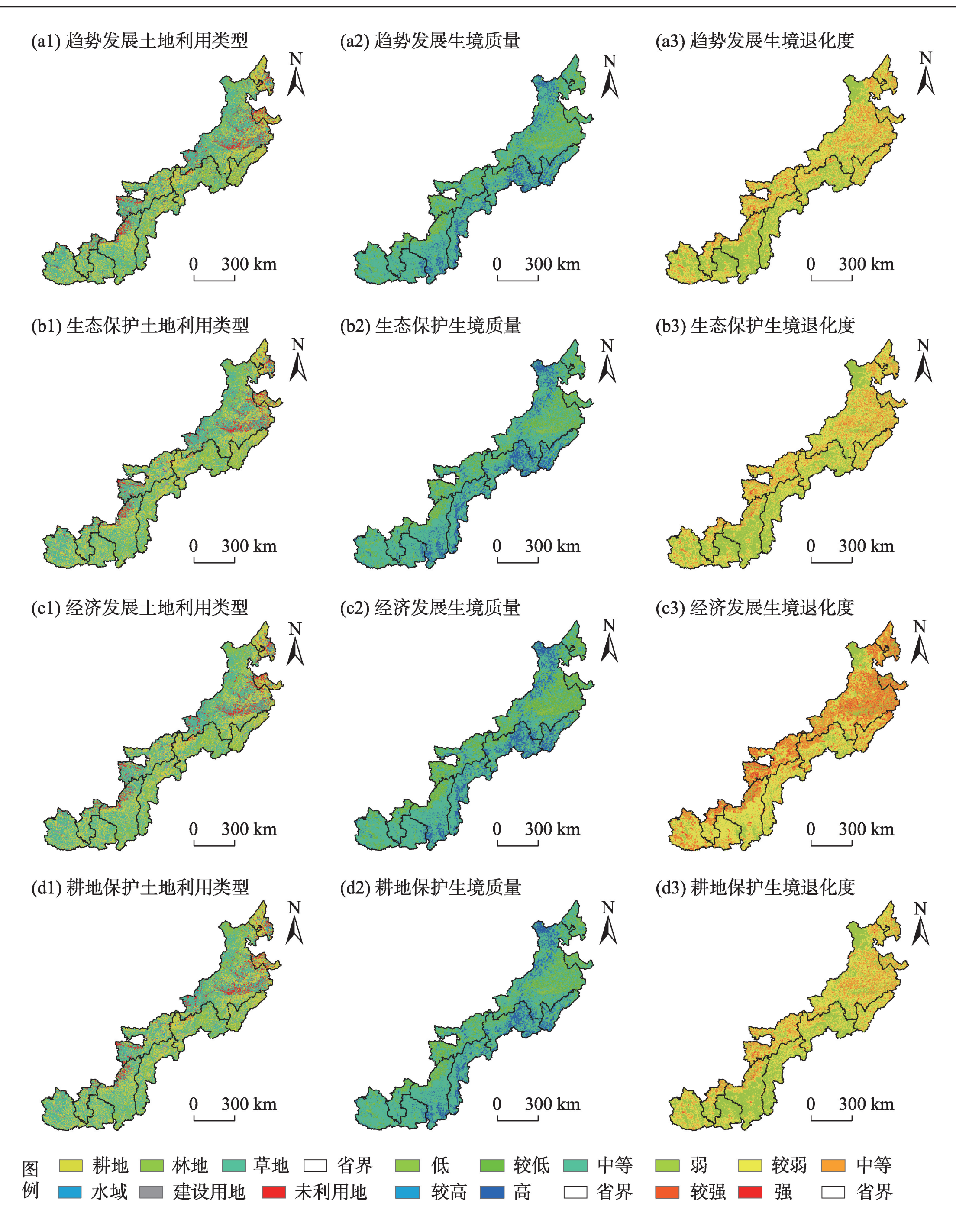


图5　2040年北方农牧交错带土地利用类型、生境质量及生境退化度

Fig. 5　Simulation results of land use, habitat quality and degradation in the agro-pastoral ecotone of northern China in 2040

对生境质量有重要影响[11],地形对生境质量的影响主要体现在温度、水源、土壤等多个方面。植被覆盖度高的地区生境质量也较高[33],如植被的生长和衰退会直接影响生态系统结构功能,进而影响生境质量。威胁因子主要通过改变适宜的生境来发挥作用,如农田开垦、居民点修建、工矿建设、资源开发等这些人为活动进而影响生境质量。

生境退化度较高的研究区主要集中在林地与其他土地类型交错的地带(图6)。建设用地研究区是生态环境质量逐渐恶化的地带,也是未来北方农牧交错带亟须加强保护的区域。当建设用地和耕地的面积比例较高时,该研究区的生态环境质量会相对较差,说明人类活动可能是导致生境退化的另一原因。这与其他学者的研究结果一致[11]。在未来的开发过程中,应加强重视林地和建设用地面积的合理分布。建立自然保护区,加大保护宣传力

表6 2020年和2040年各情景下北方农牧交错带不同等级的生境质量面积

Tab. 6 Different levels of habitat quality under different scenarios in 2040 and 2020 in the agro-pastoral ecotone of northern China

/km²

生境质量	2020年	2040年			
		趋势发展	生态保护	经济发展	耕地保护
低	62375	64671	60042	60007	60013
较低	144609	105034	107312	145490	107416
中等	380003	438444	423420	392848	439357
较高	24608	25162	27122	22523	23719
高	94649	72933	88348	85376	75739

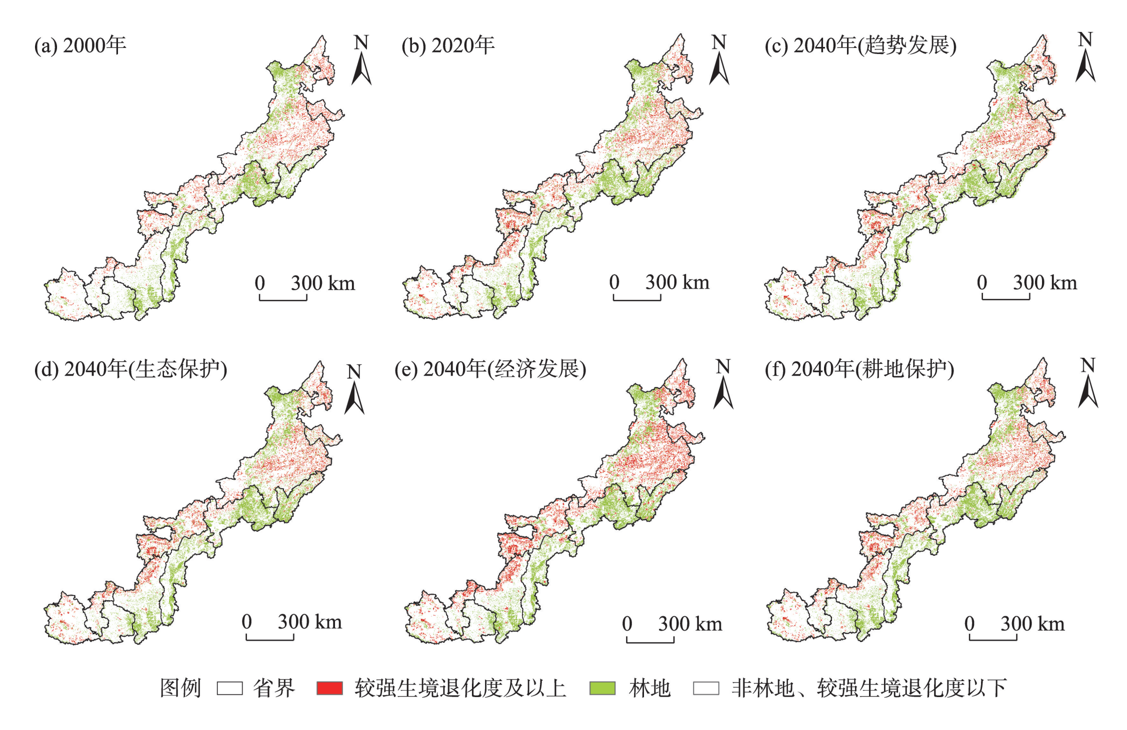


图6 北方农牧交错带在较强生境退化程度下与林地的分布特征关系

Fig. 6 Depicts significant habitat deterioration and forest spread the ecotone zone in northern China

度，促进农林牧业的合理平衡发展；加大生态系统的保护，减少不必要的人工伐木和修剪，适时地进行间伐和修剪，以促进生态系统的健康成长，并采取生态修复和树种优化等多种手段并行实施，通过实施各种不同的管理策略和技术手段，可以有效地提升林分的质量并扩大植被的覆盖范围。在极端天气条件下，加大保护措施的实施力度。

未来北方农牧交错带的发展，应实施生态保护措施，通过推动研究区的可持续发展来稳定提高生境的质量。本研究分析并预测北方农牧交错带在2000—2040年生境质量时空变化，在不同植被覆盖和土地利用类型下的生境质量和退化度方面提供更加全面的分析，旨在为该地区未来发展提供参考。然而，InVEST模型在确定威胁因子上存在一定程度的主观因素。因此，如何最大程度减小误差，对各方面更加统筹考虑，如在未来是否可以采用实验和模型相耦合的方法值得进一步思考探索。

4 结 论

（1）2000—2020年北方农牧交错带土地利用类型发生了显著转移，其中耕地变化最为显著，面积减少10157 km²，建设用地面积增加8095 km²，林地面积增加7897 km²，而未利用地的变化最小，面积减少771 km²。

（2）从空间分布来看，北方农牧交错带中东部的生境质量相对较好，而东南部的生境质量则相对

较差。在2000年生境质量的平均值是0.498,2020年减小到0.494,表明生境质量的平均值经历了一个略微减少的变化过程。

(3) 预测表明,高质量生境面积呈现出增长的趋势,低质量生境面积则有所减小,中等生境质量面积明显增多。另外,高生境质量面积占比大在生态保护情景下更加明显。高生境质量地区与林地分布地区基本重合。

参考文献(References):

[1] 赵哈林, 周瑞莲, 张铜会, 等. 我国北方农牧交错带的草地植被类型、特征及其生态问题[J]. 中国草地, 2003, 25(3): 2-9. [Zhao Halin, Zhou Ruilian, Zhang Tonghui, et al. Grassland vegetation types characteristics and ecological problems in the agriculture-pastoral ecotone in northern China[J]. Grassland in China, 2003, 25(3): 2-9.]

[2] 苏志珠, 马义娟, 刘梅. 中国北方农牧交错带形成之探讨[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2003, 26(3): 269-273. [Su Zhizhu, Ma Yijuan, Liu Mei. Study on the formation of transitional belt between agriculture and animal husbandry in northern China[J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 2003, 26(3): 269-273.]

[3] 崔潇, 王永生, 施琳娜. 北方农牧交错带人地系统耦合协调的时空特征及障碍因子[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 206-217. [Cui Xiao, Wang Yongsheng, Shi Linna. Spatio-temporal characteristics and obstacle factors of human-land system coupling coordination in farming pastoral ecotone of northern China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(1): 206-217.]

[4] 任涵, 张静静, 朱文博, 等. 太行山淇河流域土地利用变化对生境的影响[J]. 地理科学进展, 2018, 37(12): 1693-1704. [Ren Han, Zhang Jingjing, Zhu Wenbo, et al. Impact of land use change on habitat in the Qihe River Basin of Taihang Mountains[J]. Advances in Geography Science, 2018, 37(12): 1693-1704.]

[5] Ray T C, Dickson G B, Sisk D T, et al. Spatial application of a predictive wildlife occurrence model to assess alternative forest management scenarios in northern Arizona[J]. Forest Ecology and Management, 2014, 322(39): 117-126.]

[6] 吴健生, 曹祺文, 石淑芹, 等. 基于土地利用变化的京津冀生境质量时空演变[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3457-3466. [Wu Jiansheng, Cao Qiwen, Shi Shuqin, et al. Spatio-temporal variability of habitat quality in Beijing-Tianjin-Hebei Area based on land use change[J] Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26 (11): 3457-3466.]

[7] Dai L, Li S, Lewis B J, et al. The influence of land use change on the spatial-temporal variability of habitat quality between 1990 and 2010 in Northeast China[J]. Journal of Forestry Research, 2019, 30 (6): 2227-2236.

[8] 王志强, 陈志超, 郝成元. 基于HSI模型的扎龙国家级自然保护区丹顶鹤繁殖生境适宜性评价[J]. 湿地科学, 2009, 7(3): 197-201. [Wang Zhiqiang, Chen Zhichao, Hao Chengyuan. Breeding habitat suitability evaluation of Red-crown Crane in Zhalong National Nature Reserve by the Method of Habitat Suitability Index [J]. Wetland Science, 2009, 7(3): 197-201.]

[9] 白晓娟, 陈海, 刘迪, 等. 基于MaxEnt模型的生态系统服务需求及其簇的空间分异——以陕西省米脂县为例[J]. 生态学报, 2023, 43(7): 2745-2755. [Bai Xiaojuan, Chen Hai, Liu Di, et al. Spatial differentiation of ecosystem services demand and its bundles based on MaxEnt model: A case study of Mizhi County, Shaanxi Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(7): 2745-2755.]

[10] 谢怡凡, 姚顺波, 邓元杰, 等. 延安市退耕还林(草)工程对生境质量时空格局的影响[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(4): 575-586. [Xie Yifan, Yao Shunbo, Deng Yuanjie, et al. Impact of the 'Grain for Green' project on the spatial and temporal pattern of habitat quality in Yan'an City, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(4): 575-586.]

[11] 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 等. 大别山区生境质量时空特征及自然—人为因素驱动机制[J]. 环境科学, 2024, 45(4): 2268-2279. [Zheng Yaping, Zhang Junhua, Tian Huiwen, et al. Spatio-temporal characteristics of habitat quality and natural-human driven mechanism in Dabie Mountain Area[J]. Environmental Science, 2024, 45(4): 2268-2279.]

[12] 王鹏, 秦思彤, 胡慧蓉. 近30 a拉萨河流域土地利用变化和生境质量的时空演变特征[J]. 干旱区研究, 2023, 40(3): 492-503. [Wang Peng, Qin Sitong, Hu Huirong. Spatial-temporal evolution characteristics of land use change and habitat quality in the Lhasa River Basin over the past three decades[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(3): 492-503.]

[13] 苏迎庆, 刘庚, 赵景波, 等. 基于FLUS模型的汾河流域生态空间多情景模拟预测[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1152-1161. [Su Yingqing, Liu Geng, Zhao Jingbo, et al. Multi-scenario simulation prediction of ecological space in the Fenhe River Basin using the FLUS model[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1152-1161.]

[14] 荣月静, 张慧, 王岩松. 基于Logistic-CA-Markov与InVEST模型对南京市土地利用与生物多样性功能模拟评价[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 82-89. [Rong Yuejing, Zhang Hui, Wang Yansong. Assessment on land use and biodiversity in Nanjing based on Logistic-CA-Markov and InVEST Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(3): 82-89.]

[15] 刘孟竹, 张红娟, 任贺宇, 等. 退耕还林背景下北方农牧交错带土壤保持功能时空变化[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 172-178. [Liu Mengzhu, Zhang Hongjuan, Ren Heyu, et al. Spatio-temporal variations of the soil conservation function in the Agro-pastoral Ecotone of northern China Under grain for green program[J].

Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(5): 172−178.]

[16] 邱嘉琦, 于德永. 中国北方农牧交错带生态系统服务空间格局及影响因子—以内蒙古中西部地区为例[J]. 生态学报, 2023, 43(18): 7598−7609. [Qiu Jiaqi, Yu Deyong. Spatial patterns and influence factors of ecosystem services in the agro-pastoral ecotone of northern China: Taking the central and western regions of the Inner Mongolia as an example[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43 (18): 7598−7609.]

[17] 白舒婷. 中国北方农牧交错带生态系统服务时空变化及权衡与协同研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2023. [Bai Shuting. Spatio-temporal Changes, Trade-offs and Synergies of Ecosystem Services in Farming-Pastoral Ecotone of Northern China[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2023.]

[18] 石晓丽, 史文娇. 北方农牧交错带界线的变迁及其驱动力研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 1−11. [Shi Xiaoli, Shi Wenjiao. Review on boundary shift of farming-pastoral ecotone in northern China and its driving forces[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(20): 1−11.]

[19] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC)[DB/OL]. 资源与环境数据云平台, 2018. [Xu Xinliang, Liu Jiyuan, Zhang Shuwen, et al. China's multi-period land use land cover remote sensing monitoring data set (CNLUCC) [DB/OL]. Resource and Environment Data Cloud Platform, 2018.]

[20] 徐苏, 张永勇, 窦明, 等. 长江流域土地利用时空变化特征及其径流效应[J]. 地理科学进展, 2017, 36(4): 426−436. [Xu Su, Zhang Yongyong, Dou Ming, et al. Spatial distribution of land use change in the Yangtze River Basin and the impact on runoff[J]. Progress in Geography, 2017, 36(4): 426−436.]

[21] Sharp R, Douglass J, et al. InVEST 3. 8. 9. User's Guide[M]. The Natural Capital Project, Stanford University, 2020.

[22] 王琦琨, 武玮, 杨雪琪, 等. 陕西省生境质量时空演变及驱动机制分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1684−1694. [Wang Qikun, Wu Wei, Yang Xueqi, et al. Spatial-temporal changes and driving factors of habitat quality in Shanxi Province during the past 20 years[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1684−1694.]

[23] 张晓东, 武丹, 王莹, 等. 耦合InVEST与Geodetector模型的银川市生境质量时空演变特征及影响因子研究[J]. 干旱区地理, 2024, 47(7): 1242−1251. [Zhang Xiaodong, Wu Dan, Wang Ying, et al. Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of habitat quality in Yinchuan City by coupling InVEST and Geodetector models[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(7): 1242−1251.]

[24] Fang L, Liu Y, Li C, et al. Spatiotemporal characteristics and future scenario simulation of the trade-offs and synergies of mountain ecosystem services: A case study of the Dabie Mountains Area, China[J]. Chinese Geographical Science, 2023, 33(1): 144−160.

[25] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107−127.

[26] 奥勇, 蒋岭峰, 白召弟, 等. 基于格网GIS的黄河流域土地生态质量综合评价[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 164−175. [Ao Yong, Jiang Lingfeng, Bai Zhaodi, et al. Comprehensive evaluation of land ecological quality in the Yellow River Basin based on Grid-GIS[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 164−175.]

[27] Liu X P, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 168(32): 94−116.

[28] Qi B, Yu M, Li Y. Multi-scenario prediction of land-use changes and ecosystem service values in the Lhasa River Basin based on the FLUS-Markov Model[J]. Land, 2024, 13(5): 597−621.

[29] 李井浩, 柳书俊, 王志杰. 基于FLUS和InVEST模型的云贵高原土地利用与生态系统服务时空变化多情景模拟研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 287−298. [Li Jinghao, Liu Shujun, Wang Zhijie. Multi-scenario simulation of spatio-temporal changes of land use and ecosystem services in Yunnan-Guizhou Plateau based on FLUS and InVEST Models[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 287−298.]

[30] 史志刚. 大别山区水土保持工作探析[J]. 中国水利, 2012, 62 (12): 31−32. [Shi Zhigang. Analysis of soil and water conservation in Dabie Mountains[J]. China Water Resources, 2012, 62(12): 31−32.]

[31] Terrado M, Sabater S, Chaplin-Kramer B, et al. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning[J]. Science of The Total Environment, 2016, 540(47): 63−70.

[32] 张晓龙, 周继华, 刘焱序, 等. 气候变化和人类活动对内蒙古灌木林分布的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3237−3248. [Zhang Xiaolong, Zhou Jihua, Liu Yanxu, et al. Impacts of climate change and human activities on the distribution of shrubbery in Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3237−3248.]

[33] 苏军德, 赵晓冏, 李国霞, 等. 祁连山国家自然保护区生境质量时空特征及驱动因素分析[J]. 中国环境科学, 2024, 44(5): 2595−2605. [Su Dejun, Zhao Xiaojiong, Li Guoxia, et al. Spatial and temporal characteristics and driving factors of habitat quality in Qilian Mountain National Nature Reserve[J]. China Environmental Science, 2024, 44(5): 2595−2605.]

Spatiotemporal evolution and scenario simulation of habitat quality in the agro-pastoral ecotone of northern China

ZHANG Ying[1], ZHAO Yuanyuan[1], LIU Rulong[1], WANG Yue[2], DING Guodong[1]

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation, State Forestry Administration, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. School of Resources and Environmental Economics, Inner Mongolia University of Finance and Economics, Hohhot 010070, Inner Mongolia, China)

Abstract: The agro-pastoral ecotone of northern China is a typical ecologically vulnerable region. It is important to explore the spatiotemporal change in habitat quality for the scientific protection of the ecology and environment. This study analyzed the spatiotemporal patterns of habitat quality during the period 2000−2020, and simulated the future land use and habitat quality under various scenarios until 2040, based on the land-use data, FLUS-InVEST model, and spatial autocorrelation method. The results showed that (1) Grassland was the main land-use type in the region, accounting for more than 41% of land use. The cultivated land area accounted for more than 32% and the forest land area accounted for more than 16%. During the 2000−2020 period, the cultivated land changed the most, decreasin by 10157 km^2, where the unused land changed the least with an area reduction of 771 km^2. The areas of grassland and construction land had increased. (2) The habitat quality in the southeast boundary of the region was relatively high. From 2000 to 2020, the average habitat quality index changed from 0.498 to 0.494, indicating a slight decrease. The area with low habitat quality increased by 2281 km^2 and that with high grade habitat increased by 1375 km^2. The areas with a high degree of degradation showed a point distribution and were mainly concentrated in some construction land. (3) In 2040, the habitat quality is projected to improve in each scenario, but the habitat quality will improve the most in the ecological protection scenario. The area of high grade habitat increased by 2514 km^2 relative to that in 2020. In the trend development scenario, the relatively low ecological quality area would be reduced by up to 162625 km^2 relative to that in 2020. The area under cultivation, grassland, and unused land under the trend development and economic development scenarios will not change. The area of forest land under the ecological protection scenario was the largest, being 18547 km^2 more than that under the trend development scenario. In light of these findings, it is suggested that in future land-use planning and ecological environmental protection, we should focus on the areas with low habitat quality in the southeast of Inner Mongolia and northern of Hebei.

Keywords: habitat quality; the agro-pastoral ecotone of northern China; land use; spatiotemporal pattern